

Optoelektrické převodníky

v telekomunikacích

Ing. Petr Havlíček

SQS vláknová optika, Nová Paka

Opto-elektrické převodníky v telekomunikacích

1. Slovo úvodem

Předkládaný text je první ze dvou, které jsem připravil pro Dopravní fakultu ČVUT. Oba představují úvod do relativně mladého oboru, jakým je přenos informací optickými vlákny. Optická trasa se vždy skládá opto-elektrického převodníku, který vyzařuje světlo do světlovodu, a na druhé straně světlovodu z opto-elektrického převodníku - přijímače světla ze světlovodu. Proto je první přednáška a většina druhé věnována elektronickým součástkám, kterými se realizují opto-elektrické převodníky. Závěr bude zaměřen na optická vlákna jako nejběžněji používaný druh optického vlnovodu a bude doplněn pasáží o rizicích a o bezpečnosti práce s optoelektronickými součástkami a se skleněnými vlákny.

2. Optoelektronické součástky

Optoelektronické součástky je termín, který vznikl v sedmdesátých letech, souběžně se začátkem výroby LED diod. Optoelektronické součástky se vyznačují tím, že kromě elektrických signálů pracují také se signály přenášeny světlem. Protože klasické LED diody generují světlo patřící do viditelné části spektra, kde se jeho šíření řídí základními zákony optiky, dostalo se slovo optika do názvu těchto součástek.

Pro přenos signálů pomocí skleněných vláken se přešlo na užívání světla těch vlnových délek, pro něž měly první vyráběné typy vláken minimální útlum. Jsou to dvě oblasti vlnových délek, totiž oblast 1280 až 1340 nm a pak 1520 až 1580 nm. Obě základní komunikační oblasti (okna) se označují podle svých středových hodnot jako oblast 1310 a oblast 1550 nm. Jsou to vlnové délky mimo obor námi viditelného světla a patří svým spektrem do oblasti NIR (near infra red), neboli blízká infračervená oblast světelného spektra. Praktickou výhodou světla oblasti NIR je to, že se chová podobně jako nám známé světlo viditelné, tedy předvídatelně.

Proto lze i při použití těchto vlnových délek mluvit o optických systémech. (Lidské oko vnímá světlo od 400 nm vlnové délky (pro fialovou) do 700 nm vlnové délky pro červenou barvu.)

Optoelektronické součástky jsou pojem široký. Zahrnuje i „optočleny“ (opto-couplers). Jsou často používány v elektronických zařízeních tam, kde mají být od sebe galvanicky odděleny dvě části jednoho elektronického systému, zpracovávající stejný signál. Optočlen přenáší informaci podobě světla na malou vzdálenost, tj. minimálně nutnou ke kvalitnímu galvanickému oddělení vysílací a přijímací části dotyčné součástky.

Protože se zabýváme využitím optoelektrických součástek v telekomunikacích, zaměříme se na dva základní typy, používané pro vysílání a příjem světelného signálu na velké vzdálenosti, které jsou překlenuty optickým vláknem. Jsou to:

Jsou to

- **PIN dioda jako základní typ přijímače**
- **Laserová dioda jako představitel nejvíce používaného typu vysílače.**

Jako ukázkou přináším jednu speciální optoelektrickou součástku. Vyráběla se v trutnovském závodě firmy Infineon Technologies a byla označována jako BIDI (bidirectional) modul.

Z laického pohledu je to „tranzistor na niti“. To co vypadá jako „nit“, je asi 1,5 m optického vlákna s optickým konektorem na konci. Také to není tranzistor, ale součástka, která v sobě sdružuje laserovou diodu a PIN diodu. Je postavena tak, aby umožňovala současnou komunikaci po jednom optickém vlákně v obou směrech (!).

Z hlediska přenosu informace mezi dvěma subjekty je to režim zvaný plný duplex, duplex-full. (Jiné druhy přenosu informací označujeme jako half-duplex a simplex).

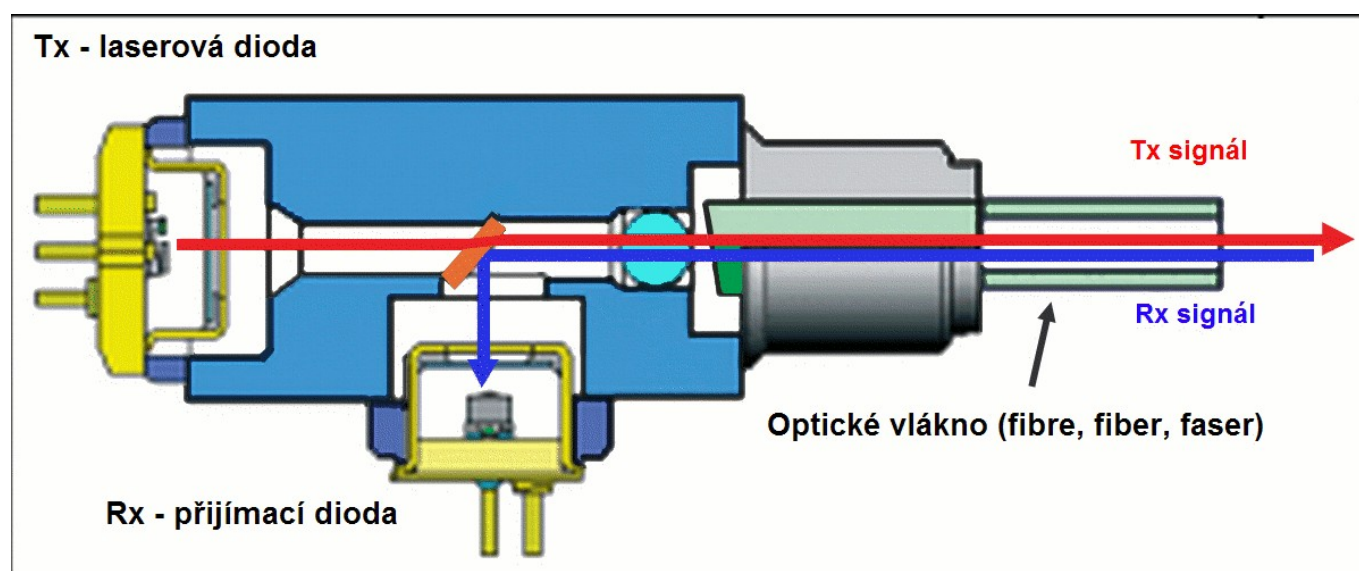
Pro představu, jaké komunikační možnosti nabízí vláknová optika, srovnáme klasický telefon s kapacitou optického spoje s dvěma BIDI moduly na koncích.

Klasické telefonní ústředny byly na vstupu vybaveny filtry, které pracovaly jako pásmové propusti. Omezovaly přicházející i odcházející signály pouze na harmonické složky v rozsahu 300 Hz až 3 kHz. Hodnota každého z těchto dvou mezních kmitočtů má svůj praktický důvod.

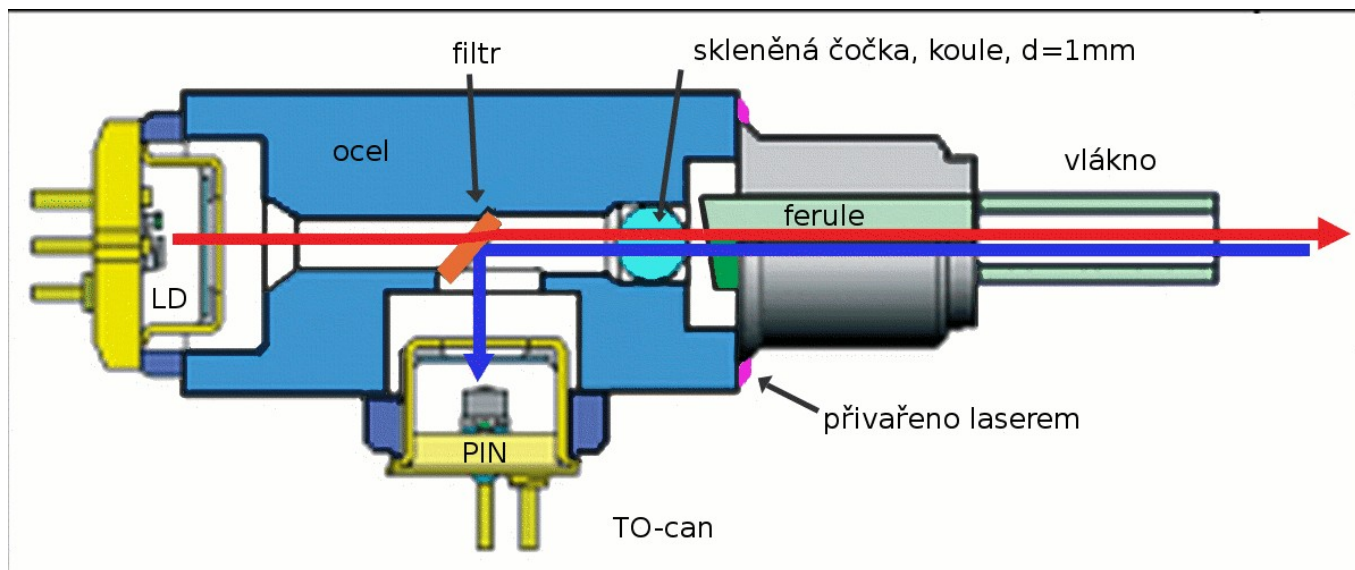
BIDI moduly jsou schopny přenášet signály až do hodnoty 2,4 GHz . Pro jednoduchost uvažujme pro srovnávání s klasickým telefonem hodnotu 3 GHz. V obou případech jde o plný duplex. U klasického telefonu je tedy šířka pásma (3 kHz), tj. o 6 řádů(!) nižší, než šířka pásma dosažitelná u optického spoje s BIDI moduly. Zanedbáme-li generační rozdíly (např. dnes realizovatelnou digitální komprimaci dat), je to jako milion telefonních hovorů přenášených současně po jednom optickém vlákně!

2.1. BIDI modul

BIDI modul v řezu je znázorněn na obr. č.1. Povšimněte si, že vystupující optický signál Tx znázorněný červeně vychází z laserové diody a že modrý vstupující optický signál Rx je polopropustným zrcátkem usměrněn do přijímací diody. Barevné rozlišení obou optických signálů činí obrázek zřetelnějším, ale má i další význam. BIDI moduly totiž předpokládají, že se vlnové délky světla v jednom a v druhém směru budou navzájem lišit. Aby bylo možné zapojit dva BIDI moduly proti sobě na jedno vlákno, byly vyráběny jako komplementární páry pracující s vlnovými délkami v pásmu 1310 nm a v pásmu 1550 nm. V aplikaci to potom znamenalo, že když jeden modul vysílal světlo vlnové délky 1310 nm a přijímal světlo vlnové délky 1550 nm, na opačném konci vlákna musel být modul, který naopak vysílal světlo v pásmu 1550 nm a přijímal v pásmu 1310 nm.



Obrázek 1: BIDI modul



Obrázek 2: BIDI modul - konstrukce

2.2. PIN dioda-základní typ přijímače optického signálu v telekomunikacích

Je celkem zřejmé, že PIN dioda se od běžné diody s PN přechodem liší jen málo (tím písmenem I uprostřed zkratky). A tak se výklad PIN diody redukuje na detailní vysvětlení funkce PN přechodu a toto vysvětlení obsahuje i základní vlastnosti a schopnosti PIN diody.

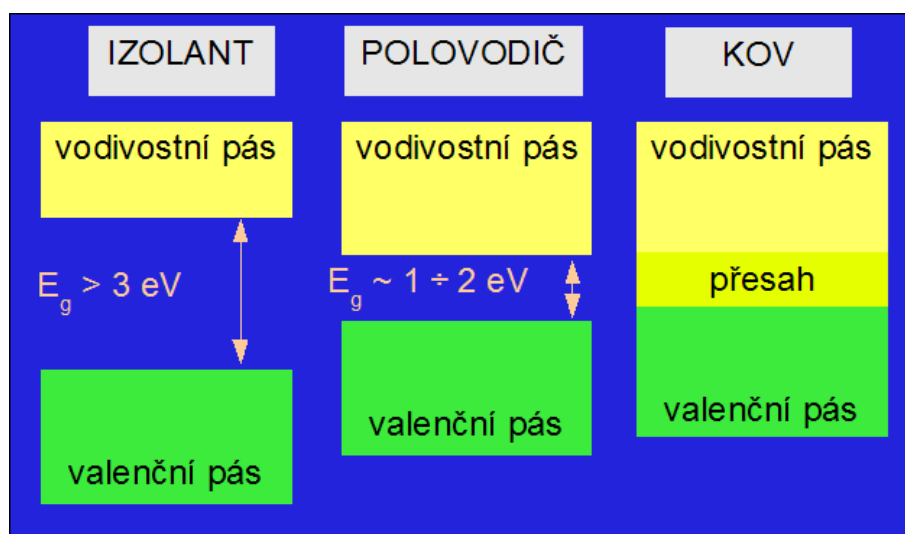
2.2.1. Polovodiče

PN přechod lze vytvořit pouze v monokrystalu polovodičového materiálu. Pro polovodiče je charakteristická malá šířka zakázaného pásu (viz obrázek č. 3). Všimněme si, že všechny typy látek mají v atomech také elektrony s nízkou energií, které jsou v tzv. valenčním pásu. Tyto elektrony jsou prostorově vázané k atomovým jádrům a je-li zvnějšku přiloženo elektrické pole, nemohou se v látce pohybovat. Jejich přítomnost v blízkosti atomového jádra je nutnou součástí, nutnou podmínkou vazby mezi atomy. Aby se tyto elektrony v látce mohly pohybovat od atomu k atomu, musí nabýt větší energie. Jinak řečeno musí se dostat do pásu vodivostního. Pod pojmem pás zde rozumíme interval energií, energetických stavů, kterých mohou elektrony nabývat.

Ve vodivostním pásu mají elektrony takové hodnoty energie, které zvyšují pravděpodobnost, že se elektron bude v blízkosti (v přítomnosti) elektrického pole v látce pohybovat.

Potřebná energie, kterou musí elektron obdržet, aby přešel z pásma valenčního do pásma vodivostního, je u různých látek různá. U izolantů a polovodičů se mezi valenčním a vodivostním pásem vyskytuje oblast takových energií, kterých podle kvantové teorie elektron nabývat nemůže, a musí tento pás přeskočit. Je to tzv. zakázané pásmo, které se u kovů nevyskytuje, jak je patrné z obr. č. 3.

V kovech se vyskytuje mnoho elektronů, které se mohou v přítomnosti elektrického pole volně pohybovat a tak přenášet elektrický náboj. Tento pozoruhodný fenomén způsobil, že se ve fyzice někdy hovoří o elektronovém plynu v kovech.



Obrázek 3: Elektrické vlastnosti pevných látek

Pásové diagramy jsou charakteristické pro fyziku pevných látek.

Kvantová teorie říká, že v blízkosti jádra jednoho atomu daného prvku může elektron nabývat jen některých diskrétních hodnot energie. V krystalu však máme odlišnou situaci. Atomů je velké množství, jsou blízko sebe a vzájemně se ovlivňují. Sousední atomy vytvářejí vazby. Slabšími interakcemi na sebe působí i atomy, které nejsou bezprostředními sousedy.

V důsledku všech interakcí nepředstavují povolené energetické stavy elektronů jen několik hodnot. Povolených stavů je mnoho a splývají do celých pásů povolených energií.

Krystaly polovodičových prvků jsou velmi zajímavé útvary, protože mohou být jednoduše, ale přitom absolutně přesně definovány. Proto také je možné šířku zakázaného pásu v krystalu polovodiče stanovit.

2.2.2. PN přechod

Pokud v dalším textu budou uváděny vlastnosti nějakého konkrétního polovodiče, půjde vždy o Si (křemík).

Jak již bylo řečeno, PN přechod lze realizovat pouze v monokrystalech polovodiče. Označení monokrystal zdůrazňuje, že v celém tělese krystalu je zaručena pravidelná krystalická struktura s pravidelným uspořádáním atomů, že by tam neměla být ani jediná porucha. Má-li krystal splňovat takto vysoké nároky na kvalitu, není nutné, aby výchozí materiál byl dokonale čistý a aby obsahoval pouze atomy jednoho prvku. V krystalové mřížce se mohou vyskytnout i atomy prvku jiného, avšak natolik podobné atomům prvku základního, že jejich přítomnost sice znamená jistou nehomogenitu, ale nezpůsobí poruchu mřížky. Faktu, že je možné vytvořit monokrystal i s příměsí jiných prvků, se naopak využívá k modifikaci vlastností krystalu, neboli polovodičové krystaly se dotují pomocí příměsí. Příměsí pětimocných prvků v krystalu čtyřmocného křemíku (Si) se chovají jako donory. Každý atom donoru vnáší do krystalu jeden elektron, který se do vodivostního pásu dostává snadněji. A naopak příměsí trojmocných prvků se chovají jako akceptory a vnášejí do krystalu tzv. díry. Taková díra okolní atomy ovlivňuje tak, že usnadňuje pohyb elektronů mezi atomy.

Jsou-li v krystalu polovodiče přítomny donory nebo akceptory, stává se polovodičem dotovaným a jeho vodivost o několik řádů vzroste.

2.2.3. Intrinsický polovodič

Můžeme si představit dokonale čistý krystal polovodiče, v němž nejsou žádné příměsi. Takový polovodič teoreticky maximální čistoty se nazývá pravý intrinsický (vlastní) polovodič. Jeho vodivost je vždy menší než vodivost polovodiče dotovaného. Vyrobit dokonale čistý polovodič je technicky nemožné, avšak vyrobit krystal, který se intrinsickému polovodiči velmi podobá, je uskutečnitelné. Krystal je třeba dotovat tak, aby se koncentrace donorů a akceptorů přesně shodovaly, aby si odpovídaly. Jejich vlivy na vlastnosti celého krystalu se uplatňují statisticky a vzájemně se kompenzují, takže výsledné chování polovodiče se pravému intrinsickému polovodiči velmi blíží, velmi podobá. Mluvíme o tzv. **nepravém intrinsickém polovodiči**.

(Pravé a nepravé intrinsické polovodiče se liší rozdílnými teplotními závislostmi svých vodivostí a jejich charakterem.)

V některých učebních textech popisujících funkci PN přechodu je výklad často matoucí. Čtenář může nabýt dojmu, že v polovodiči typu N jsou jako příměs užity atomy donoru a že naopak polovodič typu P je dotován atomy akceptoru. Jde o informaci velmi zjednodušenou, až zavádějící. Skutečnost je složitější:

Polovodič typu N, je ta část krystalu polovodiče, v níž jako příměs statisticky převažují atomy donoru. Polovodič typu P je ta část krystalu polovodiče, ve které jako příměs převažují atomy akceptoru.

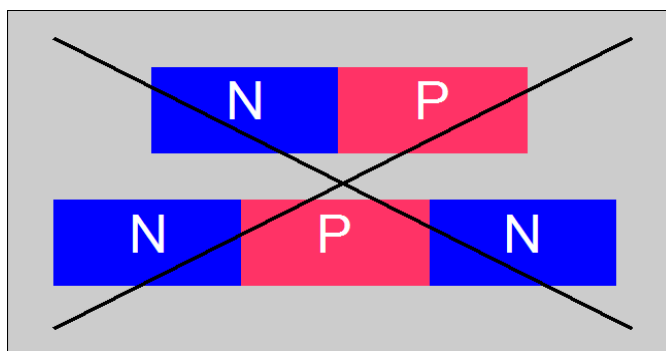
Takto formulovaná definice je složitější a méně přehledná, ale představuje dobrou zprávu pro výrobce polovodičových součástek. Znamená to, že část krystalu s vodivostí typu N lze předotovat na typ P a naopak. Stačí např. vzít základní krystal (P) vyrobený s příměsí akceptorů rovnoměrně rozptýlených v celém prostoru a za vysoké teploty ho podrobit působení horkých par donoru. Uplatní se mechanismus difuze a atomy donoru budou pronikat do krystalu. Při difuzi můžeme koncentraci atomů příměsi spolehlivě řídit pomocí těch parametrů procesu, které lze snadno ovládat. Jsou to: koncentrace donorů v plynné fázi, pracovní teplota a doba trvání procesu. Těsně pod povrchem krystalu bude koncentrace donorů nejvyšší. Bude-li vyšší, než koncentrace akceptorů v původním materiálu, typ vodivosti se tam změní z typu P na typ N.

Hluběji pod povrchem bude koncentrace donorů klesat, až nakonec bude nižší než koncentrace akceptorů, a tak v této části krystalu bude zachována vodivost typu P. Je zřejmé, že existuje jistá vzdálenost od povrchu, kdy obě koncentrace budou přesně stejné. Vlastnosti v této oblasti krystalu se budou blížit vlastnostem intrinsického polovodiče. Vytvoří se také jakási 3D plocha, která bude představovat PN přechod, jelikož na jedné straně této plochy budou v krystalu převládat akceptory a na druhé straně budou převládat donory.

Pozn.: Zmíněná výrobní metoda využívá difusi. V praxi se pro vnášení příměsí do krystalu používá také postup založený na iontové implantaci. Ionty příměsí jsou ve vakuu urychlovány elektrickým polem a „nastřelovány“ pod povrch krystalu.

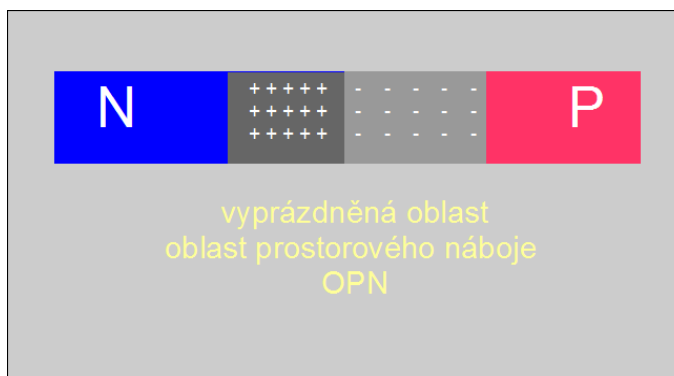
2.2.4. Funkce PN přechodu

Zjednodušený výklad funkce PN přechodu zavádí důležitý pojem, který ke škodě věci nebyl v některých starších učebnicích pro střední školy uváděn, ale je pro správné chápání základních vlastností PN přechodu zásadní. Je to pojem „vyprázdněná oblast“. V textech bývá pouze uváděno schéma podobné obr. č 4.



Obrázek 4: Odmítnuté schéma diody a tranzistoru

Na dalším obrázku č.5 je schéma PN přechodu s vyznačením dvou oblastí prostorového náboje. Povšimněme si, že PN přechod je vlastně struktura více než dvou (v klidu čtyř) oblastí krystalu, při čemž každá z těchto oblastí se nachází ve zvláštním stavu.



Obrázek 5: PN přechod a vyprázdněná oblast

Zde udělejme malou odbočku: Pokud budeme chtít pojmenovat v kapitole 2.2.3 zmíněnou 3D plochu, která odděluje oblast N od oblasti P, budeme muset mluvit o metalurgickém přechodu. Budeme tím nepřímo odkazovat na skutečnost, že na straně P převažuje koncentrace jiné příměsi, než na straně N. Pak nám termín PN přechod zůstane jako pojem vyjadřující komplexnější útvar vytvářený v krystalech polovodičů.

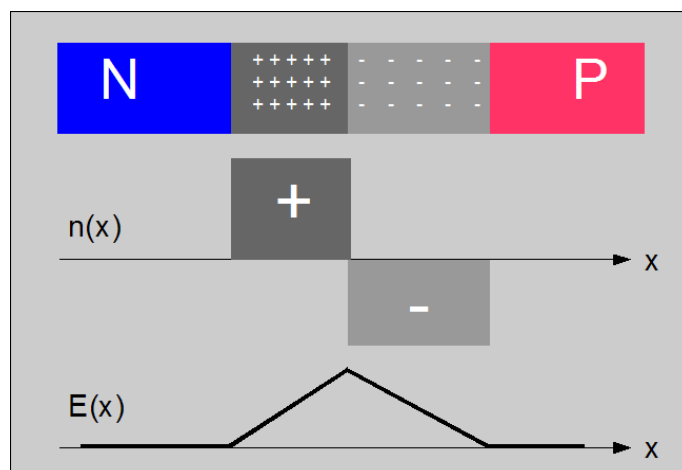
Na obrázku č.5 vidíme oblast kladného náboje v blízkosti metalurgického přechodu na straně N. Je znázorněna 15 znaménky +. Obdobně je znaménky - znázorněna oblast záporného prostorového náboje. Vypadá to, jakoby elektrony, které jsou majoritními nosiči náboje na straně N, byly přetaženy na stranu P, kde zaplnily díry u akceptorů, kteří zase převažují zde. V rámci mnemotechnicky zjednodušeného výkladu si lze představit, že tento přesun elektronů je vlastně směr proudu, kterému struktura PN přechodu nebrání. Je to tedy směr pohybu elektronů při průchodu proudem diodou v propustném směru.

Když ke krystalu křemíku s PN přechodem přiložíme vnější zdroj napětí tak, že kladný pól umístíme na stranu P a záporný pól na stranu N, přiložili jsme napětí v propustném směru. Na straně P přitahuje kladný pól elektrony a ty se mohou směrem k němu přesouvat, jak bylo popsáno v předcházejícím odstavci. Bude-li v této polaritě připojené vnější napětí menší než 0,6 V, pak vyprázdněnou oblast pouze zúžíme. Vyprázdněná oblast v oblasti PN přechodu zůstane jako překážka a proud nepoteče, protože jsme nedosáhli napětí 0,6 V, což je hodnota napětí charakteristická pro křemík. Jakmile zvyšováním napětí dosáhneme hodnoty 0,6 V, začne přechodem protékat proud. Stejný mechanismus, kdy velikostí přiloženého napětí vlastně ovládáme šířku vyprázdněné oblasti, funguje obdobně v případě, že napětí přiložíme v závěrném směru: šířku vyprázdněné oblasti tím zvětšujeme. Tohoto vnitřního mechanismu přímo využívají např. speciální součástky, a to kapacitní diody zvané varikapky.

Varikap je konstrukční prvek, který má kapacitu jako kondenzátor, ale tuto kapacitu lze měnit přikládáním stejnosměrného napětí. U varikapů je využit fakt, že PN přechod je v podstatě stejná struktura, jakou má kondenzátor, totiž struktura vodič – izolant – vodič. Protože, jak víme, kapacita kondenzátoru je nepřímo úměrná vzdálenosti vodivých desek, je nasnadě, že přiložením napětí na diodu v závěrném směru se zvětší šířka vyprázdněné oblasti a zmenší kapacita kondenzátoru.

Vyprázdněné oblasti se také říká oblast prostorového náboje. Oba názvy vystihují podstatnou vlastnost části krystalu, kde je PN přechod. Přívlastek vyprázdněný vyjadřuje fakt, že v oblasti přechodu nejsou volné nosiče náboje. Výraz prostorový náboj vystihuje jinou vlastnost této části krystalu. Při nepřítomnosti elektronů na straně N a děr na straně P totiž atomy mřížky zůstávají ve svých pevných pozicích. Na straně N jsou to donory bez elektronů, tj. částice s kladným nábojem. Na straně P jsou to akceptory se zaplněnými dírami, tj. částice s nábojem záporným.

Tímto prostorovým nábojem se vytváří elektrické pole, jehož intenzita je největší uprostřed přechodu (viz obr. č.6).



Obrázek 6: PN přechod a el. pole v oblasti prostorového náboje

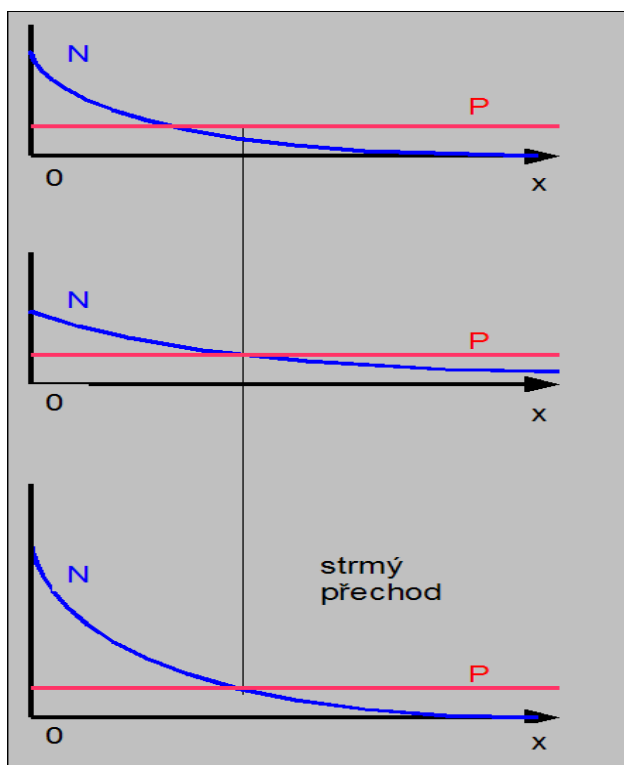
Obrázky č. 5 a 6 znázorňují PN přechod bez připojeného vnějšího napětí. Je to stav, kdy celý systém je v rovnováze. Počtem znamének je schematicky vyjádřena skutečnost, že kladný náboj na straně N je stejně velký jako záporný náboj na straně P. Rovnost celkové velikosti nábojů bude zachována i v případě, že koncentrace příměsí na straně N je jiná, než koncentrace příměsí na straně P. Již bylo řečeno, že koncentrace příměsí v krystalu se nemění skokově, ale postupně, při čemž její gradient je možno v průběhu výroby regulovat.

2.2.5. Strmost PN přechodu

Na obrázku 7 jsou nakresleny průběhy koncentrace donorů v různých vzdálenostech od povrchu krystalu. Na prvním grafu je přechod, jak vypadá na začátku difusního procesu vnášení atomů donoru do krystalu. Na druhém grafu je znázorněno, co se bude dít, když nad povrchem již nebudou atomy donoru a současně budeme dále držet krystal na vysoké teplotě (Musí být nižší než je teplota tání křemíku, tj. $< 1410^{\circ}\text{C}$.) Koncentrace atomů donoru se bude v celém prostoru vyrovnávat. U povrchu krystalu bude klesat a dále od povrchu se bude zvyšovat. Ze srovnání obou grafů je také zřejmé, že metalurgický přechod se při tom posouvá dále od povrchu krystalu. V obrázku je ještě uveden třetí graf. Porovnáme-li jej s druhým grafem, vidíme že v obou případech dostáváme metalurgický přechod ve stejné vzdálenosti od povrchu, ale podstatný rozdíl je gradientu koncentrace atomů donoru. Tento gradient je u třetího grafu větší a říkáme, že se jedná o strmější PN přechod.

Obrázek č. 7 se týká průběhů změn koncentrace donorů v různých vzdálenostech od povrchu krystalu. Na prvním grafu shora vidíme, jak vypadá přechod na začátku difusního procesu, kterým se vnášejí atomy donoru do krystalu. Prostřední graf znázorňuje, co se bude dít, když nad povrchem krystalu už nebudou atomy donoru, ale budeme krystal i dále udržovat při vysoké teplotě (ale pod teplotou tání křemíku, tj. pod 1410°C). Koncentrace atomů donoru se bude v celém prostoru vyrovnávat, a to tak, že u povrchu bude klesat a dále od povrchu se bude zvyšovat. Ze srovnání obou těchto grafů je také zřejmé, že metalurgický přechod se při tom posouvá dále od povrchu krystalu.

Pokud bychom na začátku použili koncentrovanější páry donoru a nechali je působit delší dobu, dosáhli bychom větší koncentrace donorů těsně pod povrchem krystalu. Po dalším difúzním přerozdělení koncentrace donorů v krystalu bychom dostali průběh koncentrace podle třetího grafu. Ten při srovnání s předcházejícím ukazuje, že v obou případech nastavíme metalurgický přechod ve stejné vzdálenosti od povrchu krystalu, ale podstatný rozdíl je v prostorovém gradientu koncentrace atomů donoru. Tento gradient je u třetího grafu větší, jedná se tedy o strmější PN přechod.



Obrázek 7: Strmost PN přechodu

Strmost přechodu je parametr, který má významný vliv na vlastnosti polovodičových diod a transistorů. Když přiložíme napětí v závěrném směru na diodu se strmým přechodem, vyprázdněná oblast bude užší, než kdybychom stejné napětí přiložili na diodu s menší strmostí přechodu. (Porovnejte v obr. č. 6 hustotu prostorového náboje a šířku vyprázdněné oblasti na straně N a totéž na straně P).

Intenzita elektrického pole v prostoru přechodu bude proto u strmějšího přechodu vyšší.

U diody se strmým přechodem zaujímá vyprázdněná oblast menší prostor a nosiče náboje musí překonávat menší vzdálenosti. Vyplyvá z toho, že dioda se strmým přechodem bude rychlá dioda s malým mezním závěrným napětím.

2.2.6. Proud PN přechodem v závěrném směru

Když na diodu připojíme napětí v závěrném směru, zvětšíme šířku vyprázdněné oblasti a diodou poteče jen velmi malý proud, zvaný proud v závěrném směru. Tento proud přenášejí jenom elektrony, které se do vodivostního pásu ve vyprázdněné oblasti dostávají jinak. Získávají např. energii od teplotních vibrací krystalové mřížky. Jakmile se elektron dostane do vodivostního pásu ve vyprázdněné oblasti, je unášen elektrickým polem a jeho energie se při pohybu v el. poli zvyšuje, takže projde celou vyprázdněnou oblastí a je vlastně nosičem náboje.

2.2.7. Proud PN přechodem v závěrném směru a využití PN přechodu jako senzoru

Každou polovodičovou diodu lze použít jako teplotní senzor, když ji zapojíme v závěrném směru a měříme proud. Pravděpodobnost toho, že elektron bude excitován, vybuzen, do vodivostního pásu, je exponenciálně závislá na absolutní teplotě vyjádřené v kelvinech. Pokud použijeme takový diodový senzor v malém rozsahu teplot od 0 do 40° C, můžeme na něj dokonce pohlížet jako na senzor se zanedbatelnou nelinearitou (!).

Jiná možnost, jak se elektron ve vyprázdněné oblasti může dostat z valenčního do vodivostního pásu, je mechanismus, používaný v **PIN** diodě pracující jako **detektor světla**. Zmíněným mechanismem je interakce elektronu s fotonem dopadajícím na krystal a pronikajícím do krystalu v místech, kde se nachází vyprázdněná oblast. Aby pravděpodobnost této interakce byla co největší, je třeba aby vyprázdněná oblast byla co největší a proto se připravuje dioda s extrémně nízkou strmostí přechodu. Výsledkem je struktura PIN.

Jde vlastně o diodu s tak nízkou strmostí přechodu, že v místě metalurgického přechodu, tj. v prostoru mezi částí krystalu s vodivostí P a částí krystalu s vodivostí N je relativně velký objem polovodiče, který lze označit za intrinsický (I). (Viz kap.2.2.3., jde o nepravý intrinsický polovodič.).

V přednášce jsem detailně rozebral význam symbolů P, I a N v názvu součástky. Všimněte si, že předcházející odstavec vlastně uzavírá přednášku poukazem na výstižné a trefné označení PIN diody.
